
СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.327:620.178.2

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ, ДЕФОРМАТИВНЫХ, СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ НАГРЕВЕ

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н., асп. ЛИТВИНОВСКИЙ Д. А.

*Белорусский национальный технический университет,
Брестский государственный технический университет*

Высокопрочный бетон (ВПБ) экономичнее обычного бетона, с его применением значительно расширяются архитектурные возможности. ВПБ используется в специальных конструкциях, когда требуется высокая прочность. Совершенствование его качества в сочетании с расширением возможности использования добавок-модификаторов является причинами применения ВПБ в различных сферах.

Вместе с тем, результаты последних огне-вых исследований показывают, что имеются большие различия между высокопрочным и бетоном нормальной прочности. Это выражается в изменении механических свойств (прочность бетона и модуль упругости) при повышенной температуре, кроме того, образцы ВПБ имеют высокий потенциал к взрывному разрушению при быстром нагревании. Часто взрывной характер проявляется в некоторых группах образцов, подвергнутых одинаковым условиям испытания. Неустойчивое поведение затрудняет точный прогноз взрывного разрушения ВПБ при пожаре. Предполагалось, что восприимчивость к такому разрушению у ВПБ обусловлена условиями проведения эксперимента, наличием добавки, а также низкой проницаемостью, ограничивающей возможность нагретой влаги покидать бетон. Это является результатом увеличения давления пара внутри цементного камня с ростом температуры и продолжается до тех пор, пока давление пара не приведет к взрывному разрушению нагретого бетона.

С расширением внедрения ВПБ в возводимых в Республике Беларусь высотных зданиях возникает необходимость глубокого изучения

его поведения при высоких температурах для обеспечения надежности и долговечности. Исследовано влияние высокотемпературного воздействия на традиционно контролируемые механические свойства высокопрочного бетона (прочность и деформативность), а также экспериментально определены трещиностойкость и вязкость разрушения.

Состояние вопроса. В ранних исследованиях использовались образцы обычной прочности, в более поздних (Abram, Diederichs, Castillo, Durani, Sullivan, Shansar, Hemera, Fillichetti, Schneider и др.) – образцы из ВПБ, которые подвергались высокотемпературному нагреву. Было установлено, что механические свойства бетона изменяются с ростом температуры.

Анализ результатов различных экспериментальных исследований показывает, что разброс значений при пожаре велик, а отклонения от условного среднего значения достигают более 50 %. Известно, что прочность бетона при нагреве в меньшей мере зависит от первоначальной прочности бетона, а в большей – от типа заполнителя и последовательности приложения силовой и температурной нагрузки [1, 2].

Полученные данные, в том числе на образцах с микрокремнеземом [3–5], в интервале 100–400 °С различны в связи с изменением отношения веса воды к весу цемента в/ц (более низкое содержание воды).

Опытные образцы. Методика экспериментальных исследований. Испытывались

образцы-кубы размером 100×100×100 мм из бетона двух различных составов (табл. 1).

Таблица 1

Состав бетонных смесей и их прочность на сжатие

Бетонная смесь	Расход компонентов, кг/м ³	
	Состав 1	Состав 2
Цемент ПЦ500-Д0	580	520
Щебень гранитный фракции 5–20 мм	1180	1180
Песок	620	570
Пластифицирующая добавка «ГП-1»	6,76	11,58
Микрокремнезем	–	60
Вода	150	150
Водоцементное отношение	0,258	0,288
Прочность на сжатие на 28 сут., МПа	85,7	87,5

Составы включали пластифицирующую добавку «ГП-1» (состав 1) и микрокремнезем (состав 2). Физические и химические свойства цемента приведены в табл. 2. Заполнитель – щебень гранитный карьера «Микашевичи» фракцией 5–20 мм (табл. 3). Проектная прочность на сжатие составляла 85 МПа. Повышение температуры происходило с постоянным уровнем нагрева до заданной температуры, которая выдерживалась до полного прогрева (рис. 1). Нагружение происходило до полного разрушения образца при комнатной температуре. Испытание проводилось после полного остывания образцов, т. е. исследованы остаточные свойства бетона (рис. 2, 3).

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на нормальный отрыв K_{IC}) получали по следующей формуле, подставляя данные геометрических размеров кубов и значения усилия разрушения образца:

$$K_{IC} = \frac{P}{Bd^{1/2}} \left[18,3 \left(\frac{a}{d} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{d} \right)^{2/3} + 3445 \left(\frac{a}{d} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{d} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{d} \right)^{9/2} \right], \quad (1)$$

где P – нагрузка, при которой происходит разрушение, МН; B – ширина образца, $B = 0,1$ м; d – высота образца, $d = 0,1$ м; a – глубина надрезов, $a = 0,025$ м.

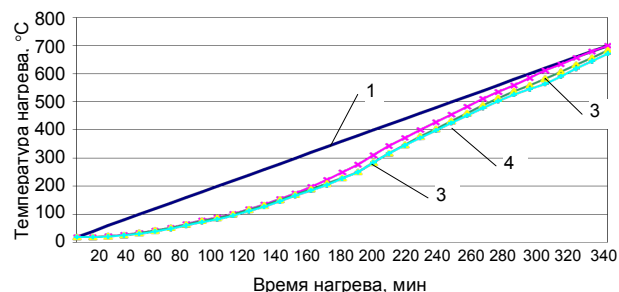


Рис. 1. График набора температуры на поверхности и внутри образца во время нагрева: 1 – температура на поверхности; 2 – то же на глубине 13 мм от поверхности; 3 – то же 25 мм; 4 – то же 50 мм

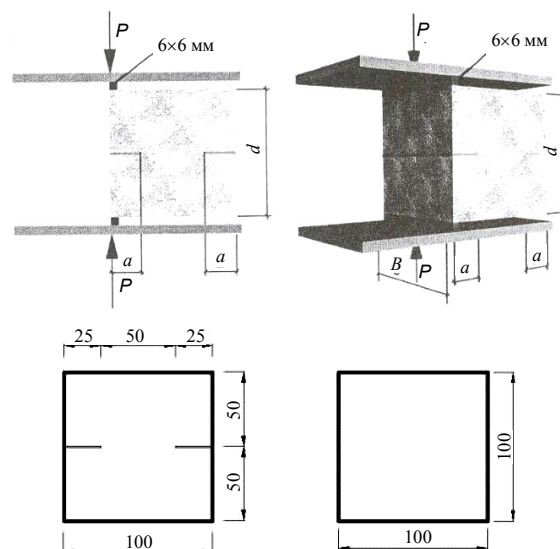


Рис. 2. Образец с инициаторами трещины и схемой нагружения

Физические и химические характеристики цемента

Минералогический состав клинкера, %				SO ₃ , %	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /кг	Нормальная густота, %	Активность цемента, МПа			Сроки схватывания		Истинная плотность, г/м ³
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF				F ₁	F ₂	F ₂₈	Начало	Конец	
57–58	18–19	4,5–5,1	13–14	1,5–3,5	290–320	23–25	16	23	50	1 ч 45 мин	3 ч 55 мин	3,14

Таблица 2

Характеристики щебня

Зерновой состав щебня	Плотность зерен ρ , кг/м ³	Межзерновая пустотность $m_{пз}$	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /кг
Частные остатки, %, на ситах размером, мм			

Таблица 3

20	10	5	<5			
8,9	64,2	23,9	3,0	2,72	0,37	0,365

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на поперечный сдвиг K_{IIc}) получали по следующей формуле, подставляя данные геометрических размеров пластины и значения разрушения изделия:

$$K_{IIc} = \frac{P}{2ta} \sqrt{dY(d,b)}, \quad (2)$$

где P – разрушающая нагрузка, МН; $Y(d, b)$ – поправочный коэффициент, равный 0,97 (при высоте образца 100 мм и ширине 100 мм); t – толщина образца, $t = 0,05$ м; H – ширина плеча, $H = 0,025$ м.

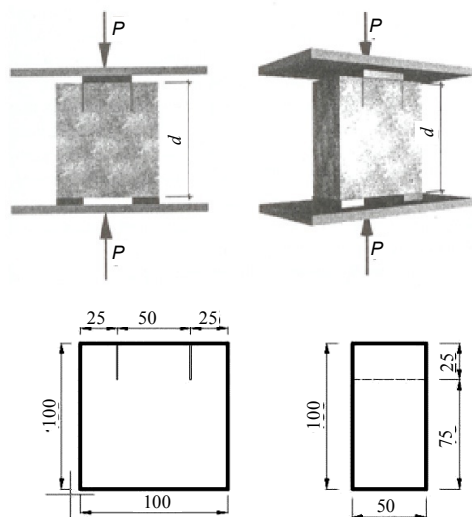


Рис. 3. Образец с инициаторами трещины и схемой нагружения

Результаты экспериментов представлены на рис. 4–8 в виде отношения полученных значений при заданной температуре к значениям при 20 °С.

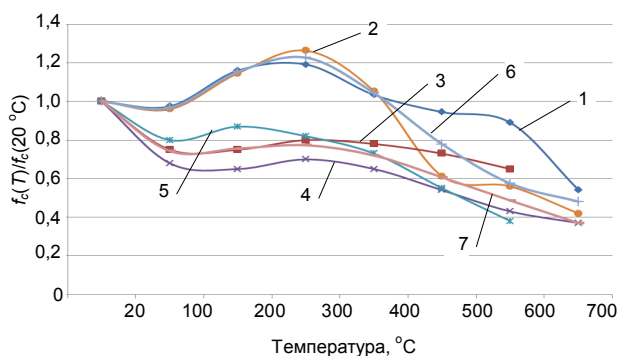


Рис. 4. Изменение прочности бетона при нагреве: 1 – автор (состав 1); 2 – автор (состав 2); 3 – Phan [6]; 4 – Die-

derichs; 5 – Pimienta [7]; 6 – среднее значение для водоцементного отношения меньше 0,3; 7 – то же больше 0,3

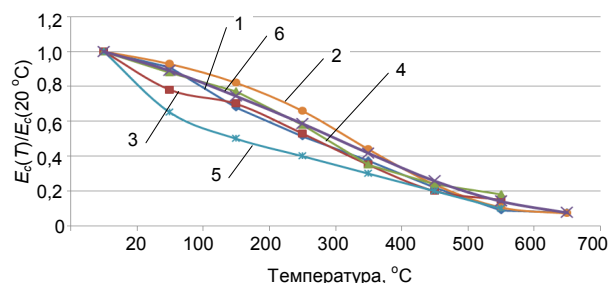


Рис. 5. Изменение модуля упругости бетона при нагреве: 1 – автор (состав 1); 2 – автор (состав 2); 3 – Phan [6]; 4 – Castillo [3]; 5 – Pimienta [7]; 6 – среднее значение

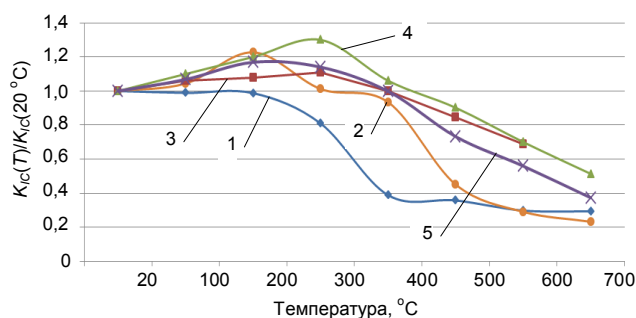


Рис. 6. Изменение коэффициента интенсивности напряжения K_{Ic} : 1 – автор (состав 1); 2 – автор (состав 2); 3 – Schneider [8]; 4 – Djakoun [4]; 5 – среднее значение

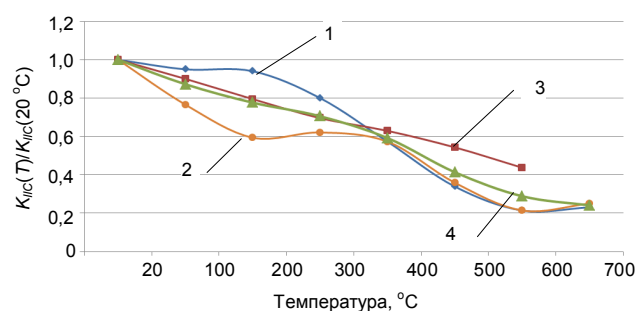
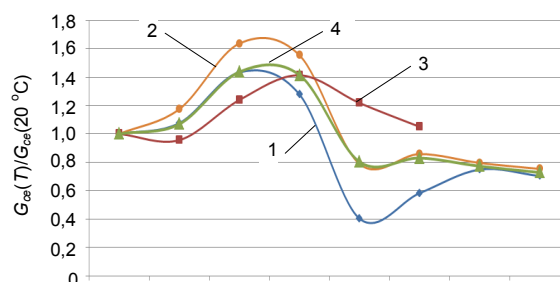


Рис. 7. Изменение коэффициента интенсивности напряжения K_{IIc} : 1 – автор (состав 1); 2 – автор (состав 2); 3 – Schneider [8]; 4 – среднее значение



20 100 200 300 400 500 600 700
Температура, °C

Рис. 8. Изменение удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение G_{ce} : 1 – автор (состав 1); 2 – автор (состав 2); 3 – Zhang [5]; 4 – среднее значение

Влияние температуры на прочность сжатия. Полученные в ходе эксперимента данные свидетельствуют о том, что в интервале температур 50–100 °C отмечается локальное снижение прочности бетона, которое, по-видимому, имеет влажностную природу и поэтому в меньшей мере проявляется на образцах. Дальнейшее повышение температуры до 300 °C приводит к увеличению прочности бетона, что объясняется возобновлением и ускорением процесса гидратации цементного камня, который является важным элементом связи структуры бетона. Однако после нагрева свыше 400 °C происходит понижение остаточной прочности, указывающее на появление трещин между заполнителем и цементным камнем с дальнейшим разрушением целостности структуры бетона.

На основании выполненных экспериментальных исследований подобраны зависимости изменения прочности бетона при нагреве:

а) для бетонов со значением в/ц меньше 0,3:

$$\frac{f_c(T)}{f_c(20^\circ\text{C})} = 1,092 - 5,768 \cdot 10^{-3} \cdot T + 6,426 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,228 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 3,004 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 1,413 \cdot 10^{-13} \cdot T^5; \quad (3)$$

б) для бетонов со значением в/ц более 0,3:

$$\frac{f_c(T)}{f_c(20^\circ\text{C})} = 1,11 - 6,175 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,252 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 6,239 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 3,767 \cdot 10^{-11} \cdot T^4, \quad (4)$$

где T – температура испытаний бетона, °C.

Давление пара в бетоне с высоким в/ц приводило к образованию большого количества трещин, что снижало прочность. При использовании микрокремнезема и нагрева до 350–400 °C происходило растрескивание со взрывным характером практически в 30 % образцов. Это, очевидно, связано со свойствами микрокремнезема, в частности с понижением паропроницаемости (закупоривание пор).

Влияние температуры на модуль упругости. В эксперименте зафиксировано, что изменение модуля упругости происходит практически линейно, потому что нагрев бетона высвобождает имеющуюся влагу и уменьшает прочность цементного камня и заполнителя, образуя трещины в структуре бетона. С постоянным ростом температуры значение E уменьшается и при 600 °C составляет 10–20 % от первоначального значения. Такое уменьшение E практически аналогично потере массы образца при нагреве.

Следует отметить, что при изменении модуля упругости при нагреве характерен меньший разброс значений (~30 %). Изменение модуля упругости бетона при нагреве выражается соотношением последней стадии:

$$\frac{E_c(T)}{E_c(20^\circ\text{C})} = 1,056 - 1,7809 \cdot 10^{-3} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-7} \cdot T^2. \quad (5)$$

Силовые и энергетические параметры (вязкость разрушения). Для определения характеристик трещиностойкости для неравновесных испытаний авторами применялись специальные образцы бетона для испытаний на сжатие в прессе с помощью двух опор из металлических брусков (рис. 2). Разрушение образцов происходило неустойчиво по плоскости движущейся трещины между двумя надрезами. Расчет коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве производили по формуле (1).

В интервале температур 20–300 °C отмечается увеличение коэффициента интенсивности напряжения, т. е. повышение трещиностойкости. Тем не менее после прогрева бетона до 300 °C и выше происходит значительное снижение данного параметра, что объясняется химическим процессом в структуре бетона.

Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} бетона при нагреве в рамках полученных экспериментальных данных описано формулой

$$\frac{K_{IC}(T)}{K_{IC}(20^\circ\text{C})} = 0,919 + 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot T - 8,901 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 5,321 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (6)$$

Трещиностойкость бетона при поперечном сдвиге определяли при испытании на срез образцов 2-го типа в виде плиты с двумя параллельными надрезами, который испытывался с помощью опор из металлических прокладок (рис. 3).

Большим преимуществом данного испытания является то, что два образца 2-го типа в виде плиты получаем при испытании образца 1-го типа – куба. Таким образом, коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} и поперечном сдвиге K_{IIc} определяются не на образцах – близнецах, а на одном фрагменте бетона.

Изменение коэффициента интенсивности напряжения K_{IIc} бетона при нагреве описано формулой

$$\frac{K_{IIc}(T)}{K_{IIc}(20\text{ }^{\circ}\text{C})} = 0,991 - 7,178 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,44 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 1,282 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (7)$$

Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге был рассчитан по (2).

В результате испытаний установлено, что K_{IIc} уменьшается практически линейно. Определены удельные энергозатраты на статическое деформирование образцов до деления на части G_{ce} из зависимости b по экспериментально определенным значениям критического коэффициента интенсивности напряжений и модуля упругости

$$G_{ce} = \frac{K_{IIc}^2}{E_b}, \quad (8)$$

где K_{IIc} – коэффициент интенсивности напряжения при нормальном отрыве, МН/м^{3/2}; E_b – модуль упругости бетона, МПа.

Влияние высокой температуры на G_{ce} изображено на рис. 8. Очевидно, что энергия разрушения увеличивается значительно (до 50 %), когда температура достигает 300 °С.

Изменение удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение G_{ce} бетона при нагреве описано математически:

$$\begin{aligned} \frac{G_{ce}(T)}{G_{ce}(20\text{ }^{\circ}\text{C})} = & 1,309 - 2,065 \cdot 10^{-2} \cdot T + \\ & + 3,02 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,534 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + \\ & + 3,514 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 3,76 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 + \\ & + 1,534 \cdot 10^{-15} \cdot T^6. \end{aligned} \quad (9)$$

ВЫВОДЫ

1. Получены аналитические зависимости для расчета прочностных и деформативных характеристик высокопрочного бетона при высоких температурах.

2. Впервые определены параметры вязкости разрушения высокопрочного бетона при нагреве с целью обеспечения надежности и исключения взрывного разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Милованов, А. Ф.** Стойкость железобетонных конструкций при пожаре // А. Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
2. **Ройтман, В. М.** Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий // В. М. Ройтман. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. – 382 с.
3. **Castillo, C.** Effect of transient high temperature on high-strength concrete / C. Castillo // ACI structural journal. – 1990. – Vol. 87. – P. 8.
4. **Djaknoun, S.** Characterization of the Fracture Toughness of the Concrete Mortars Exposed to Elevated Temperatures. Laboratoire de Mecanique / S. Djaknoun // American Journal of Applied Sciences. – 2009. – Vol. 6 (2). – P. 296–305.
5. **Zhang, B.** Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450 °C: the effect of heating temperatures and testing conditions; Napier University; University of Glasgow / B. Zhang // Magazine of concrete Research. – 2006. – Vol. 58. – P. 277–288.
6. **Phan, L. T.** Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures / L. T. Phan // NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology. – 2001.
7. **Pimienta, P.** The impact of the addition of polypropylene fibres on the mechanical properties of high performance concretes exposed to high temperatures / P. Pimienta // 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. – 2004.
8. **Schneider, U.** The fracture mechanical behavior of HPC and OPC at high temperature / U. Schneider // Vienna University of Technology, 2009.

Поступила 03.08.2010